基于 OLSR 协议的无人机自组网多径路由策略 *

姚玉坤，张本俊†，任丽丹

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065)

摘 要：近年来，无人机的应用愈发普遍，多个无人机协同完成任务大幅提高了工作效率。基于此现象，众多学者投身于无人机群通信方式的研究，并且路由协议一直都是网络研究的重点。针对现有文献在研究路由协议时选择的路由度量未能结合无人机自组织网络当时的性能水平进而造成路由决策不合理的问题，提出了一种具有负载感知和网络拓扑变动感知能力的多指标多径优化链路状态路由协议(Optimized Link State Routing Protocol based on Multi-indicator and Multi-Path，MIMP-OLSR)。该协议首先考虑了无人机场景的节点移动特性和网络的生存时间，并定义了 3 个用于进行路由选择的指标，即节点的 MAC 层阻塞度、节点的邻居变化率和节点的 MPR_S(Multi-Point Relay Selector，多点中继选择节点)邻居数目；其次，结合 HELLO 和 TC 两种控制消息提出了一种指标通告机制，用于将指标信息洪泛给全网节点；最后，根据指标信息提出了一种多径路由方案。仿真结果表明，与 OLSR、SETT_MPOLSR 和 UAV-OLSR 协议相比，所提协议 MIMP-OLSR 在成功率、端到端时延和吞吐量性能上均有明显提高，进而证明所提多径路由方案的合理性。

关键词：无人机自组网；OLSR；多指标多径路由；HELLO 消息；TC 消息

中图分类号：TN929.5 doi: 10.19734/j.issn.1001-3695.2022.03.0104

Multi-path routing strategy of UAV Ad hoc network based on OLSR protocol

Yao Yukun, Zhang Benjun†, Ren Lidan

(*school of Communication & Information Engineering*, *Chongqing University of Posts & Telecommunications*, *Chongqing* 400065,*China)*

Abstract: In recent years, the application of drones has become more and more common, and multiple drones can work together to complete tasks, which greatly improves work efficiency. Based on this phenomenon, many scholars devote themselves to the research on the communication mode of UAV swarms, and routing protocols are always the focus of network research. Aiming at the problem that the routing metric selected in the research of routing protocols in the existing literature fails to combine the performance level of the UAV self-organizing network at that time and results in unreasonable routing decisions, this paper proposed a multi-indicator and multi-path optimized link state routing protocol with load awareness and network topology change awareness (Optimized Link State Routing Protocol based on Multi-indicators and Multi-Path, MIMP-OLSR) . Firstly, the proposed protocol considered the mobility characteristics of nodes and the lifetime of the network in the UAV scene, and defined three indicators for routing, namely the node's MAC layer blocking degree, the node's neighbor change rate and the number of MPR_S neighbors of the node; Secondly, combined with HELLO and TC control messages, this paper proposed an indicator notification mechanism to flood the indicator information to the whole nodes of the network; Finally, according to the indicator information, this paper proposed a multi-path routing scheme. The Simulation results show that compared with OLSR, SETT_MPOLSR and UAV-OLSR protocols, the proposed MIMP-OLSR protocol significantly improves success rate, end-to-end delay and throughput performance, which further proves the rationality of the proposed multipath routing scheme.

Key words: UAV Ad hoc network; OLSR; multi-indicator and multi-path; HELLO message; TC message

0 引言

无人机自组网(UAV Ad-hoc Networks，UANETs)作为一种特殊的移动自组网[1](Mobile Ad-hoc Network，MANET)，除了具有 MANET 的无中心和自组织的特点[2]，还有着其自己的区域覆盖度低[3]、节点移动性高和对通信时延要求高的特性。由于无人机较高的灵活性和便利性，近年来 UANETs 受到广泛关注。

路由协议作为自组网的核心技术，一直是该领域内的研究热点。从在数据到达前是否已经建立路由的角度出发，可以将现有的路由协议分为 3 类，即先验式路由协议、反映式路由协议和混合式路由协议[4]。OLSR[5~7]，一种先验式路由协议，凭借其低时延的优良特性，在无人机自组网中得到普遍使用。

目前，现有文献对于无人机自组网 OLSR 协议的研究总体上可以分为两类，即单径路由和多径路由。多径路由协议有多条用于数据传输的路由，对数据进行分流，在显著增加网络吞吐量的同时又可以减少数据的端到端时延[8]，大幅提高网络性能。因此，对于多径 OLSR 协议的研究很有必要，国内外涌现出不少对此感兴趣的学者。

收稿日期：2022-03-07；**修回日期：**2022-04-15 **基金项目：**国家自然科学基金资助项目(61379159)；长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT1299)

作者简介：姚玉坤(1964-)，女，重庆渝中人，教授，硕导，硕士，主要研究方向为网络管理与应用、网络编码；张本俊(1997-)，男(通信作者)，安徽六安人，硕士研究生，主要研究方向为无人机自组网路由协议(1125039917@qq.com)；任丽丹(1996-)，女，山西吕梁人，硕士研究生，主要研究方向为网络编码.

文献[9]提出一种能量和队列感知的多径OLSR路由协议MBQA-OLSR。该协议定义了剩余能量、空闲时间和队列长度这三个与能量及 QoS(Quality of Service)相关的节点度量，并基于该三个度量构造了新的链路成本函数，用于衡量节点之间的链路质量。通过计算得到了到达目的节点的最有效和最可靠的路径，并且仿真结果表明该方案极大地提高了包交付成功率和端到端时延性能。实际上，该协议未考虑网络拓扑的动态变化。

文献[10]基于网络编码可以利用无线信道的广播特性这一出发点，提出了一种基于 OLSR 协议的 FANETs(Flying Ad-hoc Network，飞行自组网)多径路由方案 NC-OLSR，该方案建立了一种基于邻居节点链路质量的混合多路径选择模型并针对每个端到端传输任务设计了一种基于网络编码的数据传输方案。实际上，该协议未考虑节点的能耗问题。

文献[11]在计算路由时考虑了能量和节点移动速度，并基于这两个因素对链路的稳定性进行排序，进而提出了基于MP-OLSRv2 的多路径能量和移动感知路由方案。实际上，该协议未考虑节点的负载问题。

文献[12]基于能量水平、移动性和链路质量参数三个状态参量并使用 Q-learning 算法来选择最优节能中间节点和得到最优路由，保证了网络在一段时间内的稳定性、可靠性和生存期。

文献[13]以节点的寿命、剩余能量、节点的空闲时间、节点移速和队列长度为路由度量，提出了一种高 QoS、低能耗的多径 OLSR 路由协议 MEQSA-OLSRv2。

文献[14]计算了节点间链路的期望传输次数和带宽值，并以期望传输时间为路由度量，提出了一种基于期望传输时间的多径 OLSR 路由协议 SETT_MPOLSR。实际上，该协议未考虑节点的负载和能量问题。

文献[15]针对无人机自组网的动态性和能量受限的特点，提出了一种适用于无人机自组网的路由协议，即 UAV-OLSR。该协议首先根据在 HELLO 消息发送间隔内邻居的变化情况以及在 TC 消息发送间隔内的拓扑变化情况感知网络变动幅度并对这两种控制消息的发送周期进行了调整；其次，基于链路和能量对 MPR 机制进行了优化；最后，基于上述指标提出了一种多径路由机制。实际上该协议牺牲的控销开销较大并且缺少全网节点如何获得路由度量信息的描述。

本文结合上述研究并考虑到无人机的特定场景，提出一种具有负载和网络拓扑感知的无人机自组网改进多径路由协议，主要内容包括：1)定义多个反映网络当前性能的指标；2)提出一种指标通告机制，用于全网节点获得指标信息；3)基于所得指标信息，定义一个目标函数，并提出一种多径路由方案。

1　无人机自组网中 OLSR 协议的研究

OLSR 协议，作为移动自组网中的一种典型路由协议，为了实现在数据到达时节点能及时找到合适路由进而减小端到端时延的目的，整体上完成了两个通信过程，即节点的入网和发现过程与基于拓扑洪泛并采用最短路径算法进而生成全网路由的过程。上述两个过程分别基于 HELLO 和 TC 两种控制息。

1.1　HELLO 消息的发送和处理过程

使用 OLSR 协议的分布式网络中的每个节点，每隔 2s，在本节点通信范围内广播 HELLO 消息，用于更新并通告本节点当前已经发现的邻居及其状态信息。HELLO 消息包括 3 种邻居信息，即非对称邻居、对称邻居和 MPR(Multi-Point Relay)邻居。本节点能收到其他节点发来的 HELLO 消息便将此节点设置为非对称邻居，且能在有效时间内和同一节点完成 HELLO 消息三次握手的过程，则两者互为对称邻居。本节点根据一跳和两跳信息使用 MPR 选择算法选出的节点记为 MPR 邻居。

1.2　TC 消息的发送和处理过程

网络中的 MPR 节点，每隔 5s，广播一次 TC 消息，用于告知周围节点选择自己作为中继节点的 MPR_S 节点信息。其中，MPR 和 MPR_S 节点互为对称邻居。该 TC 消息会被本节点的 MPR 节点继续洪泛，进而网络中的所有节点都能获得全网拓扑，并以跳数作为路由度量在本地执行 Dijkstra 算法获得到其他节点的最短路由。

1.3　问题描述

对于任何一个路由协议，在执行完整的通信过程后得到的路由应当具有合理性和可靠性。针对 OLSR 协议的路由生成过程，主要存在以下两个问题。

a) 路由指标单一。OLSR 协议在计算路由时，采用了 Dijkstra 算法，以跳数作为选路依据，但实际上数据交互的端到端时延并不仅仅由跳数来约束，还受无人机自组网当时的负载情况和网络变动幅度等因素影响。因此，从合理性角度出发，仅使用跳数作为单一的路由判断指标存在不足。

b) 可达路由单一。大多数现有文献对于 OLSR 协议的研究中，节点之间仅有一条可达路由。考虑到 UANETs 网络中的无人机节点可能有较多数据需要交互，使得这条唯一路由中的某条无线链路因为网络阻塞或节点能量不足而发生中断时，数据就会因为缺少路由而无法及时交付并最终丢弃，进而大幅度降低网络性能。因此，从可靠性角度出发，在源节点和目的节点间存在多条路由时，仅建立一条可达路由存在不足。

2　改进协议 MIMP-OLSR 的原理和实现

针对 1.3 节中无人机场景下 OLSR 协议的路由计算过程中存在的两个问题，本文提出了一种基于多路由指标的多路径路由算法 MIMP-OLSR。该算法首先结合了无人机节点移动的特性在计算路由时新增了 3 个路由指标，对所得路由的合理性做了优化；其次，基于多个路由指标，提出一种多路径路由方案，进而提高了路由的可靠性。

2.1　多个路由指标

针对无人机自组网 OLSR 协议路由指标单一的问题，从节点的负载能力、网络拓扑变动幅度和网络生存时间性能的角度出发，在进行路由计算时分别考虑了节点 MAC 层的阻塞度、节点的一跳邻居变化率和节点的 MPR_S 节点数目这三个指标。上述三个指标的定义如下。

1) 节点 MAC 层的阻塞度

本文中，OLSR 协议的全部通信过程在网络层实现，为了实现可靠传输，在 MAC 层建立了缓冲区，并使用了确认重传机制，主要用于数据通信的源端未在设定的时间间隔内收到来自目的端对应包的 ACK 时，对数据包进行重传。为了定量分析节点的 MAC 层阻塞度，文中考虑了 MAC 层的缓冲区使用率。对于任意时刻，缓冲区中的包主要有 7 种，分别为：待发送的数据包、待转发的数据包、待发送的 HELLO 包、待发送的 TC 包、待转发的 TC 包、重传的数据包、ACK 包，数目分别为 num_{s_d} 、num_{f_d} 、num_{s_H} 、num_{s_T} 、num_{f_T} 、num_{ret_d} 、和 num_{ack} 。假设缓冲区大小为 L，定义节点 MAC 层的阻塞度 C，如式(1)所示。

$$C=\frac{num_{s_d}+num_{f_d}+num_{s_H}+num_{s_T}+num_{f_T}+num_{ret_d}+num_{ack}}{L} \quad (1)$$

在计算路由时，尽量选择 MAC 层阻塞度较小的节点，减少节点负载，进而减小数据交互的端到端时延。

2) 节点的一跳邻居变化率

一跳邻居变化率，表示节点在两个 HELLO 消息发送时

刻之间变化的邻居数目与原邻居数目的比例，可以定量估算节点周围的网络拓扑变动幅度。OLSR 协议中，节点收到 TC 消息后，更新拓扑表，并设置拓扑表项的有效时间，通常为 3 个 TC 消息发送间隔。因此，为了防止拓扑信息失效，选取拓扑变动幅度较小的节点作为源端到目的端的完整路由的中间节点更合适。定义一跳邻居变化率 R_{neigh}，如式(2)所示。

$$R_{neigh}=\frac{num_{incr}+num_{decr}}{num_{orig}} \tag{2}$$

其中，num_{incr} 表示两个 HELLO 消息发送时刻之间新增的邻居数目；num_{decr} 表示减少的邻居数目；num_{orig} 表示变化前的邻居数目。

3) 节点的 MPR_S 节点数目

MPR_S 节点，表示选择本节点作为 MPR 节点的节点。节点的 MPR_S 节点的数目可从 TC 消息的表项获得，记录为 num_{MPR_S}。当某个节点被多个 MPR_S 节点选择作为中继，则它需要为这些 MPR_S 节点转发其 TC 消息。因此，num_{MPR_S} 越大，节点剩余能量消耗的越多，网络的生存时间越短。

2.2　指标通告机制

为了将每个节点的上述指标信息通知给全网其他节点，进而用于之后的路由选择，需要借助 HELLO 和 TC 消息进行通告。根据节点是否被选为 MPR 节点(判断 MPR_S 集是否为空)，对 HELLO 和 TC 消息的发送和接收采取不同处理方式，具体如下。

1) 发送 HELLO 消息

改进协议中，对 OLSR 协议中的 HELLO 消息格式作出修改，如图 1 所示。

Reserved		Htime	Willingness
Link Code	Reserved	Link Message Size	
Neighbor Interface Address			
...			
Neighbor Interface Address			
Link Code	Reserved	Link Message Size	
Neighbor Interface Address			
...			
Neighbor Interface Address			
Link Code	Reserved	Link Message Size	
Neighbor Interface Address			
...			
Neighbor Interface Address			
C		R_{neigh}	

图 1　修改后的 HELLO 消息包格式

Fig. 1　The packet format of modified HELLO message

上图中，Reserved 字段的值为 0 或 1。若本节点是 MPR 节点，则 Reserved=0；否则，Reserved=1。若 Reserved=1，本节点 A 需要通过 HELLO 消息将本节点的指标 1 和指标 2 信息告知其 MPR 节点(之后由该 MPR 节点通过 TC 消息将本节点的指标信息通告全网)，故新增了两个字段，用于表示 MAC 层阻塞度 C 和一跳邻居变化率 R_{neigh} 信息，并且 Reserved=1 表示该节点选择其 MPR 集合中的节点作为指标信息的代转发节点；若 Reserved=0，HELLO 消息中不含有 C 和 R_{neigh} 字段。

除上述不同外，其余处理与 OLSR 协议相同。

2) 接收 HELLO 消息

提取 Reserved 字段值，若 Reserved=0，则 HELLO 消息的处理与 OLSR 协议的处理相同；否则：收到的 HELLO 消息后将指标信息记录在本节点内存中(假设用探查表来存储，探查表的结构如表 1 所示)。

表 1　探查表表结构

Tab. 1　The structure of Exploration table

Node	C	R_{neigh}	flag_forward	delete_time

从表 1 中可以看出，探查表有 5 个表项，分别为：代转发信息节点 P、P 的 C 值、P 的 R_{neigh} 值、是否需要代转发的标志位 flag_forward 和表项到期删除时间 delete_time。

除上述不同外，其余处理与 OLSR 协议相同。

3) 发送 TC 消息

改进协议中，通过在 TC 消息中加入 C 和 R_{neigh} 信息并洪泛，实现指标信息的全网通告。

如图 2 所示为修改后的 TC 消息包格式。其中，C 和 R_{neigh} 为同一节点的一对指标信息。Reserved 字段的值表示指标对的数目，即需要代转发指标信息的节点个数，并且 Reserved>=1。遍历 HELLO 消息处理后更新的探查表，并作以下判断：

若探查表为空，则只在 TC 消息中添加本节点的 C 和 R_{neigh} 信息，并设置 Reserved=1；

若探查表不为空，则在 TC 消息中添加本节点及需要代转发信息的节点(实际上也是某一个 MPR_S 节点)的一对指标信息，此时 Reserved>1。为了将指标信息与 MPR_S 节点对应，设置 TC 消息的 MPR_S 节点的序号与指标对的序号相对应，即当 Reserved>1 时，第一个 MPR_S 节点对应第一对指标信息，并在最后添加本节点的一对指标信息。

除上述不同外，其余处理与 OLSR 协议相同。

4) 接收 TC 消息

将 TC 消息中的 C 和 R_{neigh} 信息与节点对应，统计每个 TC 消息发送方的 MPR_S 节点数目，并将这 3 个指标记录在本地内存中，便于之后的路由计算。

除上述不同外，其余处理与 OLSR 协议相同。

ANSN	Reserved
Advertised Neighbor Address	
...	
Advertised Neighbor Address	
C	R_{neigh}
...	
C	R_{neigh}

图 2　修改后的 TC 消息包格式

Fig. 2　The packet format of modified TC message

2.3　多路径路由机制

针对无人机自组网 OLSR 协议可达路由单一的问题，并结合上述路由指标，提出了一种多路径路由机制，即在节点之间维护多条可达路由。考虑到无人机自组网对于数据时延性能的高要求，而跳数又与时延成正相关的关系，故在多路径路由时仍以跳数作为路由的第一衡量指标。由于维护多条路由会造成计算开销增大，故改进协议 MIMP-OLSR 协议中源节点和目的节点之间只维护两条路由(如果存在)。

基于指标 1 和指标 2，定义用于路由选择时的目标函数 F，如式(3)所示。

$$F=C\times R_{neigh} \tag{3}$$

由上式可知，该目标函数具有负载发现能力和拓扑感知能力，并且不同指标对于路由选择时的正负影响和相关性符

合理论分析。

以跳数为第一指标，计算前两条最短跳数的路由方案如下。

1) 根据 TC 消息建立全网拓扑，并生成无向图 G。

每个节点根据 G 执行一次 Dijkstra 算法，求出源端到目的端的最短路径，即为 P_1，并初始化变量 k=1，每个节点内部存储一个路由重复集合 M、拟备选路由集合 NR、最终备选路由集合 ZR，全部初始化为空，并将 P_1 加入 M、NR 和 ZR。

判断是否满足 k＜2，若不满足，算法结束。否则：将当前的最短路径 P_k 作为研究对象，除目的节点外，依次取 P_k 中的每个节点作为分叉点 V_x (每个节点记录一个出度，并且出度为 1 时表明以该节点作为源节点时只有一个路由的方向)。执行步骤 4)。

遍历每个分叉点，对于每个分叉点：使用 Dijkstra 算法求出分叉点到目的点的最短路径，加上 P_k 中源 S 到分叉点 V_x 的路径，得到源到目的的完整路由 Path。判断 Path 是否已经存在于路由重复集合 M 中，若不存在，加入拟备选路由集合 NR；否则，不做额外操作。当 V_x 全部遍历后，统计 NR 中的所有路由，选取跳数最短的路径，记为 P_{k+1}，将其加入最终备选路由集合 ZR，作为数据传输时的备选路由方案，同时将 P_k 移出 NR，并设置 k=k+1，执行步骤 5)。

2) 转执行步骤 3)。

上述求前 2 条最短路由的步骤用流程图表示如图 3 所示。

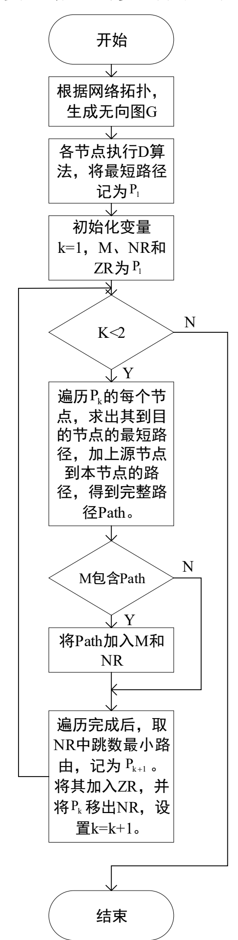


图 3　前两条最短路由求解过程

Fig. 3　The solution process of the first two shortest route

基于上述内容，完整的多路径路由方案如下:

1) 选出前两条最短跳数的路由(如果存在)。

2) 比较两条路径的跳数，若跳数相同，执行步骤 3)；否则，选择跳数最小的路由作为首选路由，另一条作为备选路由，算法结束。

分别计算每条路径上的所有节点的 MAC 层拥塞度 C 和一跳邻居变化率 R_{neigh} 的平均值，分别为 $\overline{C}$ 和 $\overline{R_{neigh}}$，并根据式

(3)计算，求得 F 值，分别为 F_1 和 F_2。

$$\frac{|F_1-F_2|}{\max_i(|F_i|)}<0.1 \tag{4}$$

若式(4)满足，则执行步骤 4)；否则，选择 F 值小的路由作为首选路由，另一条作为备选路由，算法结束。

3) 统计两条路由中，每个节点的 MPR_S 节点的数目，并求和，即为 Sum。若 Sum 值不同，则选择 Sum 值最小的路由为首选路由，另一条作为备选路由，算法结束。否则选择 ZR 中的第一条路由作为首选路由，另一条作为备选路由，算法结束。

上述过程用流程图表示如图 4 所示。

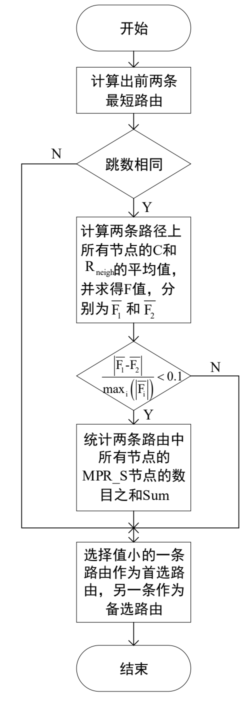


图 4　MIMP-OLSR 协议多径路由方案

Fig. 4　Multipath routing Scheme of MIMP-OLSR protocol

3　仿真验证及分析

仿真中，以 UAV-OLSR 协议、SETT_MPOLSR 协议和标准的 OLSR 协议为对比，分析了 MIMP-OLSR 和 OLSR 协议的成功率、控制开销、端到端时延和吞吐量这四个指标的性能。

3.1　仿真参数设置

基于 OPNET 仿真软件搭建了 5 个仿真场景，大小为 1200m×1200m 。仿真中的具体参数设置如表 2 所示。

表 2　仿真参数设置

Tab. 2　Simulation parameter settings

Simulation parameter name	Parameter value
Number of nodes	30 个
Number of business flows	4 条
Packet size	1024 Bytes
Simulation time	300 s
Node’s moving speed	10~30 m/s
scene size	1200m×1200m

3.2　路由方案可行性分析

针对所提路由方案时候会增加路由震荡风险的问题：路由震荡的产生原因包括两个方面，即路由表频繁更新和路由方案设计不合理。本文所提路由方案中路由表实际上是周期性更新的，每条路由表有一定的有效时间，并且节点通信半径为 150m，移速小于 30m/s，因此在短时间内出现大幅度的网络拓扑变化的可能性较小，故路由表不会频繁地更新。根

据上文中完整的多径路由方案可知，当跳数、目标函数 F 值和 MPR_S 节点数目之和 Sum 均相同时，使用 ZR 中记录的第一条路由作为首选路由，以另一条作为备选路由，故可以解决因为路由方案不合理而导致的同值选路的问题。

针对所提路由方案是否会增加网络实际部署的复杂性问题：本文 2.2 节提出的指标通告机制可以实现路由方案需要的指标信息的全网通告而无须其他人为地部署网络，同时该网络是分布式网络并且所提的路由方案从通信过程上可知具有不同环境的适用性，故不会增加网络实际部署的复杂性。

3.3 仿真结果分析

本文中，对所提改进协议 MIMP-OLSR 的成功率、控制开销、端到端时延和吞吐量性能的仿真结果分析如下。

1) 成功率分析

成功率 $P_{success}$ 计算如式(5)所示。

$$P_{success} = \frac{Num_{recv}}{Num_{send}} \tag{5}$$

式(5)中，Num_{send} 表示发出的数据包数目，Num_{recv} 表示正确收到的数据包数目。

图 5 为四种协议的成功率曲线。该图表明成功率性能随节点移速的增加而呈减少趋势，这是因为节点移速增大时，拓扑变动地更频繁，造成节点在传数据时路由可能已经失效，进而收包数目 Num_{recv} 减少，故成功率降低。MIMP-OLSR 协议的成功率为四者之中最高。对于 SETT_MPOLSR 协议：首先在计算路由时，不仅考虑了跳数，还考虑了不同链路之间的差异并提出期望传输时间 ETT 的概念，进而使得计算出的路由更能贴合网络的实际性能；其次，该协议从源端到目的端维护了多条可用路由，当主路由失败时，可以启用备用路由用于数据的交付，故 SETT_MPOLSR 协议的成功率较 OLSR 协议有所提高。对于 UAV-OLSR 协议，该协议提出了改进 MPR 机制和多径路由机制，同时牺牲的开销较 SETT_MPOLSR 协议更小而用于数据传输的带宽更大，故成功率性能较 SETT_MPOLSR 协议更高。对于 MIMP-OLSR 协议：在计算路由时考虑了节点的负载能力、网络拓扑变动幅度和网络生存时间，相比 UAV-OLSR 协议更全面并且也维护了多条可用路由，而 MIMP-OLSR 协议的开销较 UAV-OLSR 协议更小导致实际更多的带宽被用于数据传输，故在成功率性能上较 UAV-OLSR 协议又有所提升。

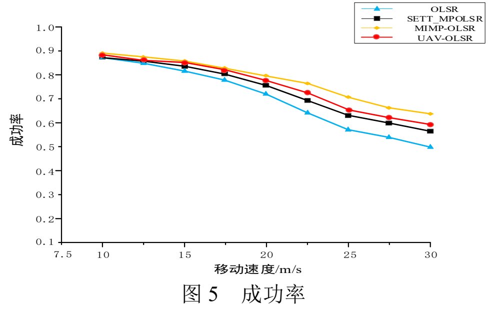


图 5　成功率

Fig. 5　Success rate

2) 控制开销分析

控制开销由 HELLO 和 TC 两种控制消息产生。如图 6 所示，四种协议的控制开销曲线整体上都呈现平稳趋势，都在其稳定值 S 附近上下波动。控制开销大小取决于控制消息的频率和消息本身的大小。当节点移速增加时，一跳邻居变化的较快，可能造成节点的 HELLO 消息内的表项增加，并且移速较大时拓扑更新较快，可能导致 TC 消息丢失，进而被继续洪泛的 TC 消息减少，故整体上控制消息大小变动的范围不大，并且趋于稳定，但四者的稳定值 S 又不相同。SETT_MPOLSR 协议对 OLSR 协议的 HELLO 和 TC 消息的包格式做了修改：首先对 HELLO 中的每个邻居添加了 3 个 32bits 的字段，用于计算期待传输时间 ETT；其次，对 TC 消息中的每个邻居添加了 1 个 32bits 的字段用于洪泛求出的 ETT 信息，这使得 SETT_MPOLSR 的稳定值 S 相比 OLSR 有较大地增加。UAV-OLSR 协议在 HELLO 和 TC 消息中添加了 50bits 的字段用于携带路由指标信息，故控制开销介于 OLSR 协议和 SETT_MPOLSR 协议之间。MIMP-OLSR 协议虽然也修改了 HELLO 和 TC 消息的包格式，但是：首先对于 HELLO 消息，只有在本节点不是 MPR 节点时才会在 HELLO 消息中添加自己的一对指标信息，大小为 32bits。其次，对于 TC 消息，只有在某个节点 A 不是 MPR 节点时才需要 A 的 MPR 节点在发送 TC 消息时，将 A 的一对指标信息代转发。故 MIMP-OLSR 协议的控制开销性能介于 OLSR 和 UAV-OLSR 协议之间。

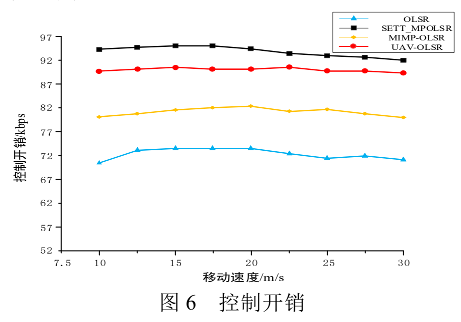


图 6　控制开销

Fig. 6　Control overhead

3) 平均端到端时延分析

平均端到端时延 D_{ete} 计算如式(6)所示。

$$D_{ete} = \frac{\sum T_{recv}}{Num_{recv}} \tag{6}$$

其中，$\sum T_{recv}$ 表示所有成功交付的数据包从发出到接收经历的时延。

图 7 为四种协议的端到端时延曲线。该图表明平均端到端时延性能均随着节点移速的增加而变差。节点移速越大，网络拓扑变动地越快，无线链路断开的概率越大，故数据的时延也越大。相比于单径路由协议 OLSR，多径路由协议的时延要低很多。当某条路由的某段链路的负载过大，可以使用另一条备用的路由，进而分散流量并减小因为负载过大造成的较大排队时延。UAV-OLSR 协议控制开销较 SETT_MPOLSR 协议更小，故有更多的带宽用于传输数据，故数据时延更小。MIMP-OLSR 协议在计算路由时综合考虑了节点的 MAC 层阻塞度、网络拓扑变化幅度和网络生存时间，并且选择了前 2 条最短路由，而跳数对于时延的影响也较大并且控制开销进一步减小，故端到端时延性能最好。

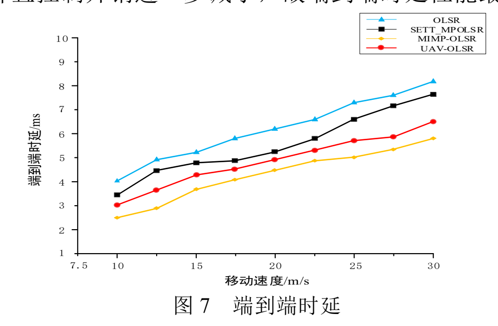


图 7　端到端时延

Fig. 7　End-to-end delay

4) 吞吐量分析

吞吐量 Throughput 计算如式(7)所示。

$$\text{Throughput} = \frac{Num_{recv} \times S_{pk}}{D_{ete}} \tag{7}$$

其中，S_{pk} 表示数据包的大小，仿真中为 1024 Bytes。

图 8 为四种协议的吞吐量曲线。该图表明网络的吞吐量与节点移动速度呈负相关关系。

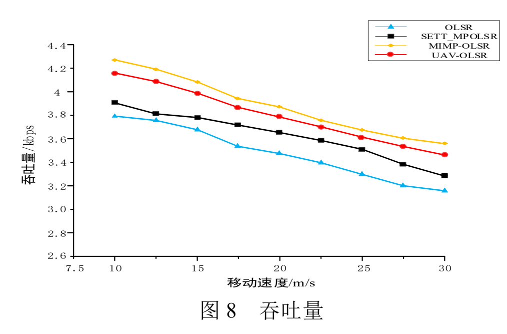


图 8　吞吐量

Fig. 8　Throughput

节点移速越大，端到端时延 D_{ete} 越大，故吞吐量越小。SETT_MPOLSR 协议在选取路由度量时综合考虑了跳数和无线链路的质量，因而计算出的路由较 OLSR 协议更加合理。SETT_MPOLSR 协议、UAV-OLSR 协议和 MIMP-OLSR 协议的控制开销逐渐减小，故实际用于传输有效数据包的带宽增大，故吞吐量性能逐渐提高。

5) 网络生存时间

网络生存时间表示一个网络可以存在的最大时间，在路由协议中通常受到节点剩余能量的限制。图 9 为四种协议的网络生存时间曲线。该图表明随着节点移动速度的增加，四种协议的网络生存时间性能均呈现下降趋势。SETT_MPOLSR 协议由于控制消息的大小较大使得能量消耗地较快，但由于该协议基于链路质量而提出了一种多径路由方案进而对网络中的数据包进行了分流，使得网络中节点能耗差异不至于过大，故网络生存时间较 OLSR 协议有所增加。UAV-OLSR 协议调整了控制消息的发送频率，并且控制消息大小较 SETT_MPOLSR 协议更小，故网络生存时间较 SETT_MPOLSR 协议更大。MIMP-OLSR 协议考虑了节点的 MPR_S 节点数目，即考虑了节点能量水平，并且控制消息的大小比 UAV-OLSR 协议更小，故网络生存时间性能得到进一步提高。

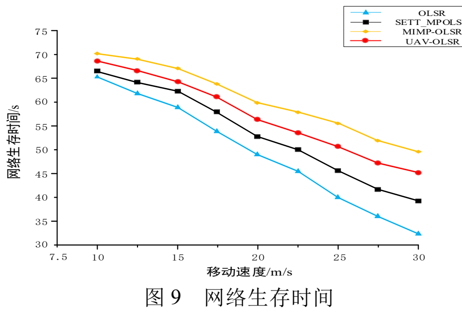


图 9　网络生存时间

Fig. 9　Network lifetime

4　结束语

现有大多数文献对于多径 OLSR 协议的研究中，在计算路由时考虑的路由度量通常为跳数和链路质量等，未能完全结合当时网络的各个性能情况。因此，本文提出了一种改进多径 OLSR 协议(MIMP-OLSR 协议)，该协议首先综合考虑了节点负载能力、网络变动幅度和网络生存时间，并定量计算了三个路由指标；其次，结合 HELLO 和 TC 两种控制消息，提出了指标通告机制，用于将指标信息通告给全网节点，同时为了满足无人机自组网对时延的高要求，在最短路由的基础上，提出了一种多径路由方案。仿真结果表明，改进协议 MIMP-OLSR 在成功率、端到端时延和吞吐量性能上表现良好。所提协议的指标通告机制中，对 HELLO 和 TC 消息的包格式做了修改，造成了一定的额外开销，下一步将针对控制开销问题考虑无人机自组网的优化多径路由方案。

参考文献：

[1] Wang Xudong, Mi Zhichao, Wang Hai, *et al.* Performance test and analysis of multi-hop network based on UAV Ad Hoc network experiment [C]// the 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2017: 1-6.

[2] Ramdhany R, Coulson G. Manetkit: A Framework for MANET Routing Protocols [C]// the 6th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. New York: IEEE Press, 2008: 261-266.

[3] 洪堃棋. 高动态低密度无人机自组织网络的 OLSR 路由协议优化 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2021.

[4] 周舟. 含网关节点的无人机自组网 OLSR 路由协议研究与实现 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.

[5] Singh G, Prateek M, Kumar S. Hybrid Genetic Firefly Algorithm-based Routing Protocol for VANETs [J]. IEEE Access. 2022, 10 (4): 9142-9151.

[6] Jain R. Ant Colony inspired Energy Efficient OLSR (AC-OLSR) Routing Protocol in MANETs [J]. Wireless Personal Communications. 2022, 6 (3): 1-14.

[7] Dafalla M, Mokhtar R, Saeed R. An optimized link state protocol for real-time application over vehicular ad-hoc network [J]. Alexandria Engineering Journal. 2022, 61 (6): 4541-4556.

[8] Tarique M, Tepe K, Adibi S. Survey of multipath routing protocols for mobile ad hoc networks [J]. Journal of Network and Computer Applocations. 2009, 32 (6): 1125-1143.

[9] Jabbar W A, Ismail M, Nordin R. Multi-criteria based multipath OLSR for battery and queue-aware routing in multi-hop ad hoc wireless networks [J]. Wireless Networks. 2014, 21 (4): 1-18.

[10] Yin Jun, Wang Lei, Han Chen, *et al.* NC-OLSR: A network coding based OLSR multipath transmission scheme for FANETs [C]// the 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI) . New York: IEEE Press, 2017: 1007-1012.

[11] Jabbar W, Ismail M, Nordin R. Energy and mobility conscious multipath routing scheme for route stability and load balancing in MANETs [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 77 (3): 245-271.

[12] Tilwari V, Dimyati K, Hindia M. Mobility, Residual Energy, and Link Quality Aware Multipath Routing in MANETs with Q-learning Algorithm [J]. Appl. Sci. 2019, 9 (8): 1582-1605.

[13] Jabbar W, Saad W, Ismail M. MEQSA-OLSRv2: A multicriteria-based hybrid multipath protocol for energy-efficient and QoS-aware data routing in MANET-WSN convergence scenarios of IoT [J]. IEEE Access. 2018, 6 (4): 76546-76572.

[14] 杨路, 朱显, 王诗言. 一种基于期望传输时间的多径 OLSR 路由协议 [J]. 计算机工程, 2018, 44 (11): 95-100. (Yang Lu, Zhu Xian, Wang Shiyan. A Multipath OLSR Routing Protocol Based on Expected Transmission Time [J]. Computer engineering, 2018, 44 (11): 95-100.)

[15] 周长家, 周建国. 一种基于 OLSR 的无人机网络适用路由算法 [J]. 计算机工程, 2021, 47 (10): 174-181. (Zhou Changjia, Zhou Jianguo. A Routing Algorithm for UAV Network Based on OLSR [J]. Computer engineering, 2021, 47 (10): 174-181.)